

УДК 550.38

Є. І. Крючков¹, Г. В. Лізунов¹, П. О. Усенко¹, В. Й. Глемба²

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, Київ

²Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України

Систематизація та первинна обробка даних експерименту «Варіант» на супутнику «Січ-1М»

Надійшла до редакції 12.02.07

Описано вимірювальні канали апаратури «Варіант» на супутнику «Січ-1М», призначені для реєстрації трьох складових електричного поля, двох складових змінного магнітного поля, трьох складових квазіпостійного магнітного поля та двох складових густини електричного струму в іоносфері. Під час політних випробувань «Січ-1М» (перша половина 2005 р.) було одержано та передано на Землю близько 230 мегабайт даних експерименту «Варіант». Подаються результати їхньої попередньої обробки, систематизації та верифікації за допомогою калібрувальних сигналів.

ВСТУП

Проект «Варіант» на борту українського супутника «Січ-1М», запущеного 24 грудня 2004 р., було реалізовано у першому півріччі 2005 р. Через нештатну орбіту та відсутність стабілізації супутника проект «Варіант» виявився фактично єдиним із запланованих експериментів, здійснення якого не втратило сенсу. За період політних випробувань «Січ-1М» було проведено серію вмикань комплексу наукової апаратури (КНА) «Варіант», який працював лише в кількох з передбачених для цієї апаратури режимів вимірювань. Тривалість окремих сеансів вимірювань складала від 1 до 21 хв. Всі ці обмеження викликані утрудненням обміну даними з супутником, який неконтрольовано обертався.

Передача даних від КНА «Варіант» на Землю здійснювалась бортовою радіолінією БИС-С у діапазоні частот 8.2 ГГц. Наукова інформація була отримана цим каналом зв'язку у кількох пунктах України й Росії, в результаті чого дані проекту «Варіант» виявилися розпорощеними серед ряду організацій та установ: ЦПОСІ та КНП (м. Дунаївці), Державне конструкторське бюро «Південне» (м. Дніпропетровськ), Інститут

космічних досліджень Російської академії наук (м. Москва), пункти приймання у м. Обнінськ та м. Отрадне в Росії. Крім того, частина даних, записаних з невеликою частотою опитування давачів 1 Гц, передавалась через низькочастотну службову радіолінію 137 МГц до пунктів приймання НЦУВКЗ (м. Євпаторія) та ЦПОСІ і КНП (м. Дунаївці).

Отже, передусім необхідно було здійснити аналіз та систематизацію наукової інформації, переданої високочастотною радіолінією. Основна частина даних була прийнята у м. Дунаївці, причому зі значними спотвореннями, які унеможливили обробку даних з використанням заздалегідь розробленого програмного забезпечення. Для відновлення результатів вимірювань довелося провести певну корекцію прийнятої інформації, для цього були створені спеціальні алгоритми та комп'ютерні програми.

Наукова інтерпретація результатів експерименту «Варіант» потребувала також супроводжувальної інформації про поточний час, географічні координати, орієнтацію КА «Січ-1М» та ін. У певних випадках цю інформацію також довелося відновлювати, а орієнтацію супутника спеціально розраховувати за даними бортових

магнітометрів та давача Сонця.

Нижче будуть описані вимірювальні канали, які входили до КНА «Варіант», організація передачі даних на Землю, верифікація результатів з використанням калібрувальних сигналів.

ВИМІРЮВАЛЬНІ КАНАЛИ КОМПЛЕКСУ «ВАРІАНТ»

Наукові завдання проекту «Варіант» та створений для їхньої реалізації інструментальний комплекс описані в роботах [1, 2, 4]. Сигнали вимірювань формувались давачами електромагнітних полів та струмів.

Електричні зонди EZ1, EZ2, EZ3, EZ4. З вихідних сигналів E_{Z1} , E_{Z2} , E_{Z3} , E_{Z4} цих чотирьох давачів при відповідній комутації і фільтрації утворюються вимірювальні канали складових електричного поля $E_{1\sim}$, $E_{2\sim}$, $E_{3\sim}$, $E_{1=}$, $E_{2=}$, $E_{3=}$ (тут і надалі позначення « \sim » означає використання в каналі фільтра високих частот, позначення « $=$ » — використання фільтра низьких частот зі збереженням постійної складової). З метою пристосування амплітудно-частотних характеристик давачів до форми очікуваних сигналів для коефіцієнтів передачі $K_{пр} = U_{вих}/U_{вх}$ були вибрані значення $K_{пр} \approx 10$ для частот $f > 1$ Гц та $K_{пр} \approx 1$ при $f < 0.1$ Гц.

Для отримання трьох складових вектора напруженості електричного поля потенціали E_{Z1} , E_{Z2} , E_{Z3} , E_{Z4} подавалися через комутатор на входи диференційних підсилювачів. Базовими давачами вибиралися EZ1 і EZ3. При виборі базовим давачем EZ1 формувалися сигнали: $E_1 = E_{Z1} - E_{Z4}$, $E_2 = E_{Z1} - E_{Z2}$, $E_3 = E_{Z1} - E_{Z3}$. У випадку вибору базовим давачем E_{Z3} — сигнали $E_1 = E_{Z3} - E_{Z1}$, $E_2 = E_{Z3} - E_{Z2}$, $E_3 = E_{Z3} - E_{Z4}$. При діленні величин E_1 , E_2 , E_3 на відстані між відповідними давачами отримувалися значення складових електричного поля в системі координат, яка відрізнялася від ортогональної (рис. 1). Це вимагало перерахунку даних до прямокутної зв'язаної системи координат супутника $\{X, Y, Z\}$, у якій вимірювалися всі інші величини. Слід відзначити, що при запланованій орієнтації КА «Січ-1М» вісь OX скерована вздовж вектора швидкості супутника, вісь OY — перпендикулярно до площини орбіти, вісь OZ — в зеніт, за напрямом штанги гравітаційного стабілізатора.

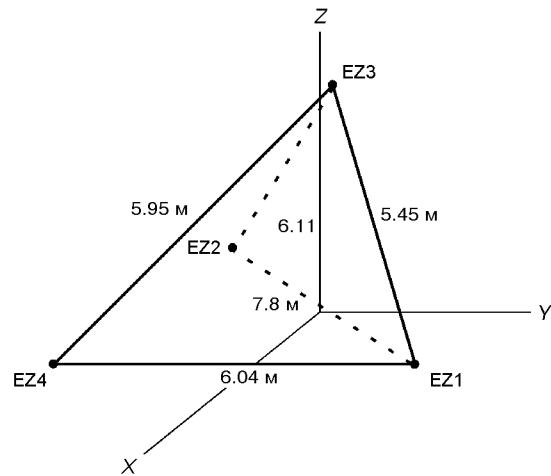


Рис. 1. Конфігурація давачів електричного поля на супутнику «Січ-1М»

Хвильовий зонд WZ1 вимірює складову змінного магнітного поля $B_{x\sim}$ та складову густини змінного електричного струму $J_{yz\sim}$. Вісь давача WZ1 розташована паралельно осі OX . Нормаль до щілини зонда, що визначає робочу площину інструмента, нахилена під кутом 45° відносно осей OY і OZ , у зв'язку з чим вимірюється відповідна складова вектора струму J_{yz} . В каналі магнітного поля коефіцієнт перетворення складає $K_{пр} = U_{вих}/B_x \approx 100$ мВ/нТ при $f > 300$ Гц. В каналі струму коефіцієнт перетворення $K_{пр} = U_{вих}/J_{yz} \approx 0.077$ В·см²/нА при $f > 1$ Гц.

Хвильовий зонд WZ2 вимірює складову змінного магнітного поля $B_{y\sim}$ і складову густини змінного електричного струму $J_{xz\sim}$. Вісь давача WZ2 розташована паралельно осі OY . Нормаль до щілини зонда нахилена під кутом 45° відносно осей OX і OZ , тому вимірюється складова струму J_{xz} . Коефіцієнти перетворення каналів магнітного поля та струму зонда WZ2 такі самі, як і для WZ1.

Циліндри Фарадея FC1, FC2 вимірюють z -складову густини струму. Два циліндри Фарадея утворюють вимірювальні канали сигналів $FC_{1\sim}$, $FC_{2\sim}$, $FC_{1=}$, $FC_{2=}$. Обидва давачі розташовані вздовж осі OZ , а їхні вікна чутливості скеровані у протилежні боки. В каналі « $=$ » коефіцієнт перетворення давачів $K_{пр} \approx 470$ мВ·см²/мкА, в каналі « \sim » $K_{пр} \approx 4780$ мВ·см²/мкА.

Пояс Роговського вимірює z -складову густину струму J_{Fz} . В діапазоні частот 30–400 Гц коефіцієнт перетворення $K_{пр} \approx 0.085 \text{ В} \cdot \text{см}^2/\text{нА}$.

Трикомпонентний ферозондовий магнітометр FZM утворює канали вимірювання квазі-постійного магнітного поля B_x, B_y, B_z . Він також дозволяє стежити за температурами давача магнітометра і блока електроніки. Магнітометр має АЦП і власний формат вихідних даних. Виміри магнітного поля подані відразу в нанотесла, а температурних давачів — у градусах Цельсія.

Циклограми роботи КНА «Варіант» передбачали режим калібрування, організований таким чином, що на вимірюваний давачем зовнішній сигнал накладався сигнал калібрування досить великої амплітуди. Наявність калібрувального сигналу в вимірювальних каналах дає змогу робити висновки про працездатність каналу та коректність процедури обробки даних. Використовувались такі форми калібрувань:

- канали $E_{1z}, E_{2z}, E_{3z}, B_{xz}, B_{yz}, J_{yz}, J_{xz}$ калібрувалися синусоїдальним сигналом з частотою 1 кГц;
- J_{Fz} — синусоїдальним сигналом з частотою 30 Гц;
- FC_{1z}, FC_{2z} — прямокутним однополярним сигналом з частотою 10 Гц;
- FC_{1z}, FC_{2z} — прямокутним різнополярним сигналом з частотою 10 Гц.

ПРИЙМАННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Як уже згадувалось, основний масив даних експерименту «Варіант» було передано на Землю через високочастотну радіолінію БИС-С КА «Січ-1М». Приймання здійснювалося в трьох пунктах — одному в Україні і двох у Росії (табл. 1); частина даних була одночасно прийнята у двох пунктах. У 10 сеансах зв'язку було передано 230 мегабайт даних у вигляді бінарних файлів. Наявність даних та час проведення вимірювань у кожному каналі подані в табл. 2.

Було реалізовано таку схему збору і передачі даних експерименту «Варіант». На борту супутника дані вимірювань компонувались у 800-байтні блоки, структура і наповнення яких визначались розробниками системи збирання наукової інформації (СЗНІ) проекту «Варіант» у

Таблиця 1. Пункти приймання та номери витків скидання даних проекту «Варіант»

№ витка	Пункти прийому		
	Дунайці	Отрадне (Росія)	Обнінськ (Росія)
597	+		
1056	+		
1057	+		
1071		+	
1087			+
1109	+		+
1139	+	+	
1278	+		
1363		+	+
1385			+
1394	+		+

Львівському центрі Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України. Для передачі на Землю ці блоки подавались в систему збирання інформації «Січ-1М», де вони поєднувались в телеметричні кадри разом з даними інших бортових приладів (апаратури ДЗЗ та ін.). На приймальних пунктах проводилась зворотна процедура виділення даних експерименту «Варіант» з телеметричних кадрів, так зване розпакування. Після цього розпаковані дані передавались учасникам проекту у центр обробки наукової інформації (ЦОНІ) Інституту космічних досліджень НАНУ-НКАУ. Алгоритми кодування і формати телеметричних кадрів, протокол обміну даних між СЗНІ комплексу «Варіант» та супутника визначались розробниками інформаційної системи БИС-С КА «Січ-1М».

Подальша обробка експериментальних даних полягала у виділенні груп 800-байтних блоків, створених СЗНІ комплексу «Варіант», з масиву переданої з супутника інформації і формуванні рядів неперервних вимірювань по окремих каналах. З цією метою у 800-байтних блоках даних містились спеціальні 26-байтні заголовки, що включали в себе псевдовипадкову послідовність з 8 байт (ПВП), поточний час, характеристики сеансу вимірювань і деяку іншу інформацію, номер вимірювального каналу комплексу «Варіант» в 10-му байті та порядковий номер блоку в 19-му та 20-му байтах.

Розпаковані у приймальному пункті м. Дунайці файли даних виявилися сильно спотвореними. Вони містили велику кількість збоїв, се-

Таблиця 2. Наявність даних у вимірювальних каналах комплексу наукової апаратури «Варіант»

Витки скидання, режими, пункт приймання	Момент вимірювання, УТ	Канал																	
		FZM			JF~	FC1		FC2		WZ1		WZ2		E1		E2		E3	
		B_x	B_y	B_z		~	=	~	=	J_{yz}	$B_{x\sim}$	J_{xz}	$B_{y\sim}$	~	=	~	=	~	=
0597 МНР2 Дунаївці	01.02.2005: 05:22:59—05:43:29	+	+	+	+	+			+	+	+			+		+		+	
1056 МНР1, калібр. Дунаївці	02.03.2005: 14:23:10—14:27:37	+	+	+	+	+			+	+	+	+			+	+	+	+	+
1057 ТХР2 Дунаївці	03.03.2005: 02:42:57—02:44:37										+	+	+	+					
1071 МНР1, калібр. Отрадне	03.03.2005: 13:48:14—13:52:41					+	+	+		+	+	+			+		+		+
1109 МНР1, калібр. Дунаївці	06.03.2005: 08:03:13—08:07:40					+	+	+	+		+	+				+		+	
1139 МНР1, калібр. Дунаївці	07.03.2005: 22:53:05—22:57:32	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1139, Отрадне	07.03.2005: 22:53:05—22:57:32	+	+	+								+	+						+
1278 МНР2 Дунаївці	17.03.2005: 10:52:49—10:57:16			+							+	+			+	+		+	
1363 МКР1 Отрадне	22.03.2005: 22:13:06—22:14:02					+	+	+	+		+	+							+
1394 МКР2 Дунаївці	24.03.2005: 22:32:47—22:33:43					+	+			+	+	+	+	+		+		+	

ред яких зайві розряди між сусідніми байтами та величезна кількість однобітових збоїв у випадкових місцях. Це унеможливило виділення даних вимірювань з використанням програмного забезпечення, заздалегідь створеного у Львівському центрі Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України. В деяких розпакованих файлах взагалі не вдалося виділити жодного вимірювального каналу (або не знайшлося достатньої кількості відповістей у ПВП, або довжина файлів не була кратною 800 байт та ін.). Виникла необхідність розробки додаткового програмного забезпечення, яке й створили спеціалісти Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства

України. З його допомогою вдалося в основному відновити дані каналів КНА «Варіант», хоча в деяких сеансах не всі канали вдалося ідентифікувати, а в ряді випадків залишились пропуски даних. Це програмне забезпечення було успішно апробоване на даних калібрувальних вимірювань КНА «Варіант».

У відновлених таким чином даних, однак, залишились випадкові збої у двобайтних словах, якими кодуються величини вимірювань. Якщо ці випадкові збої відбуваються у старших розрядах, то величина сигналу хаотично змінюється в інтервалі від -5 до $+5$ В. На рис. 2 подано приклад дуже збійного файлу вимірювань у каналі магнітного поля $B_{y\sim}$ (виток 597) з частотом викидів та пропусків даних. Очевидно, що в таких випадках шукати фізичний сигнал

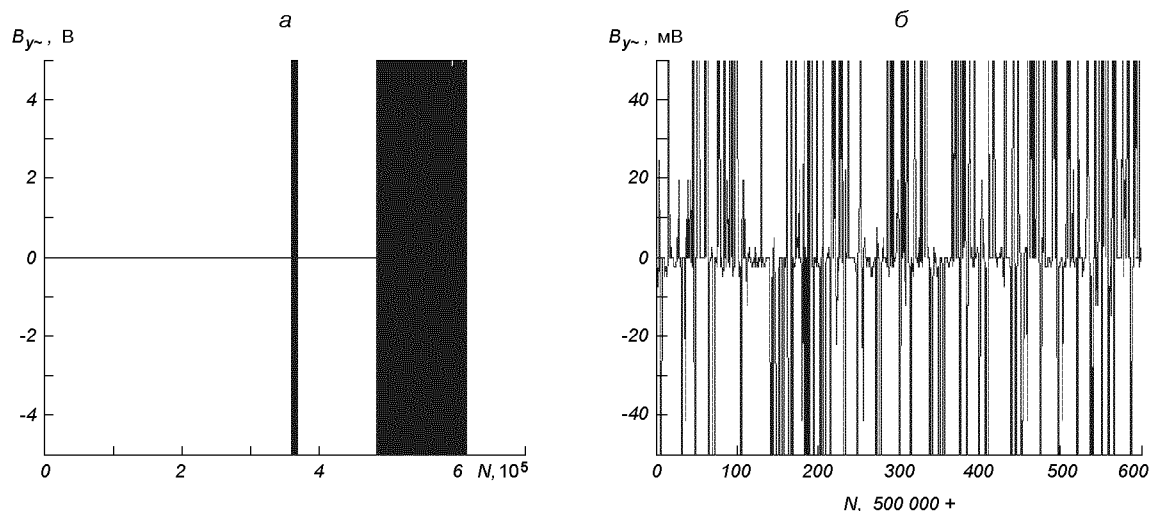


Рис. 2. Збійні дані в каналі магнітного поля (сигнал $B_{y\sim}$, вольти) на витку скидання 597 для номера відліку N : *a* — вихідний ряд, *б* — збільшений фрагмент цього ряду

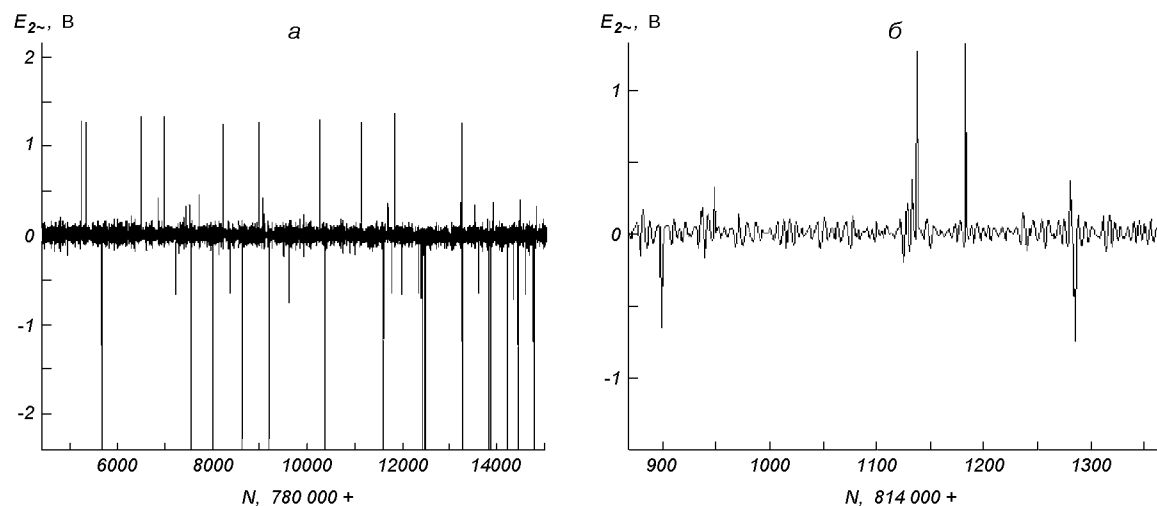


Рис. 3. Запис ряду даних в каналі електричного поля $E_{2\sim}$ на витку скидання 1278. Поодинокі викиди сигналу на окремих відліках є результатом випадкових однобітових збоїв у старших розрядах байтів, які кодують виміри

не має сенсу. В інших випадках нефізичні викиди порівняно нечисленні (рис. 3), при необхідності їх неважко виключити за тим чи іншим алгоритмом.

В результаті проведеної роботи було створено каталог ємністю 1.3 гігабайт відновлених даних проекту «Варіант», придатних для подальшого наукового аналізу. Цей каталог містить також необхідну супровідну інформацію про місцезнаходження, висоту, розраховану орієнтацію КА «Січ-1М», час та ін.

ВЕРИФІКАЦІЯ ДАНИХ ЗА КАЛІБРУВАЛЬНИМИ СИГНАЛАМИ

Коректність процедури відновлення експериментальних даних та правильність роботи окремих вимірювальних каналів перевірялась за допомогою калібрувальних сигналів КНА «Варіант». Як приклад розглянемо канали $E_{2\sim}$ і $J_{F\sim}$ у калібрувальному режимі вимірювань для витка скидання 1056. При ввімкненому генераторі калібрування на вхід диференційного підсилювача

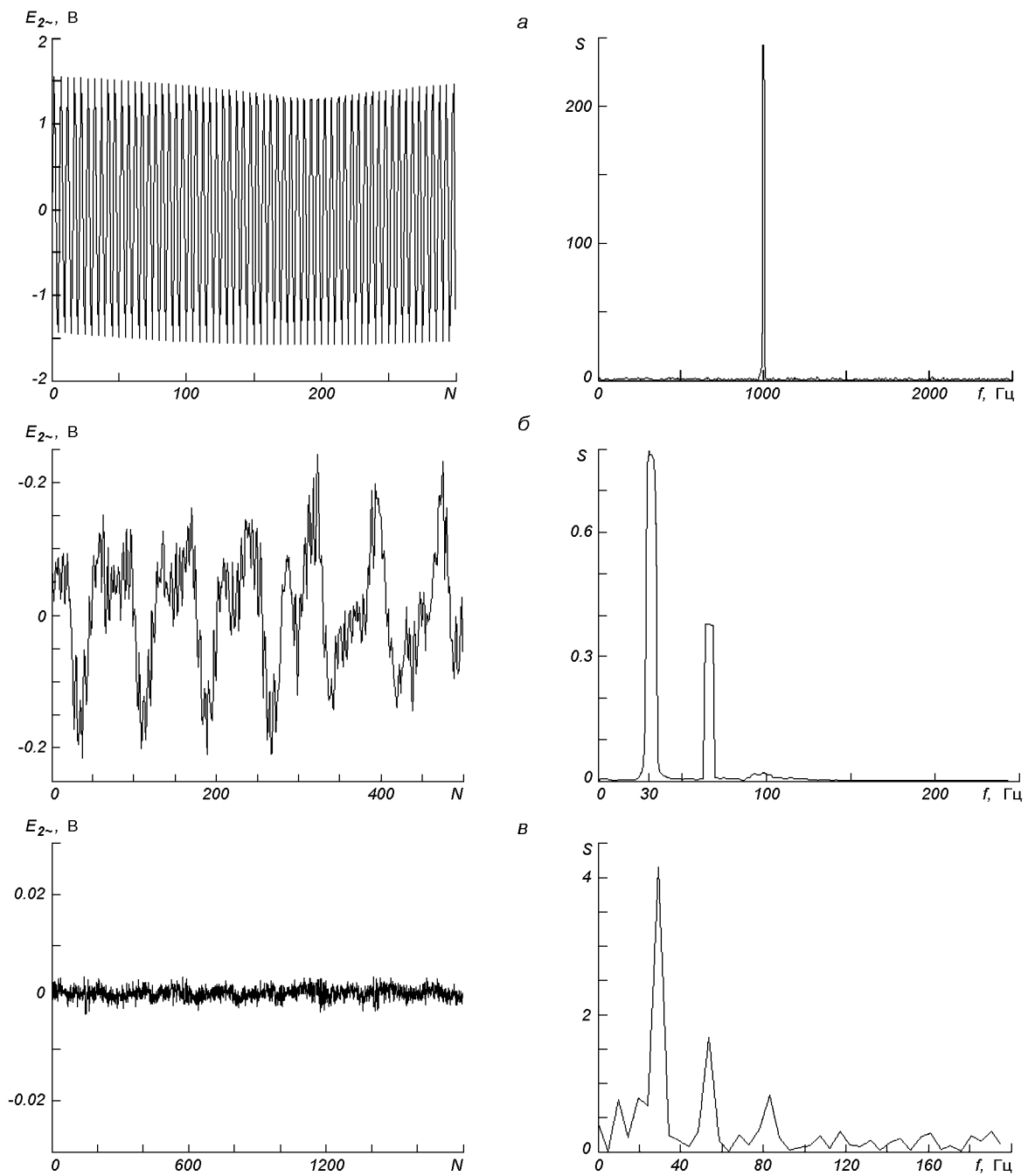


Рис. 4. Фрагменти рядів даних та фур'є-спектри: *а* — сигналу $E_{2\sim}$ на витку 1056; *б* — те ж після режекції калібрувальної частоти; *в* — сигналу $J_{P\sim}$ на витку 1056

каналу $E_{2\sim}$ подається синусоїдальна напруга з частотою 1 кГц, а на рамкову котушку пояса Роговського — синусоїдальна напруга з частотою 30 ± 5 Гц. Фрагмент калібрувального сигналу $E_{2\sim}$ показаний на рис. 4, на фур'є-спектрі чітко виділяється частота 1 кГц. Фрагмент калібрувального сигналу каналу $J_{F\sim}$ та його спектр показані на рис. 4, в. Тут виділяється як калібрувальна частота 30 Гц, так і її друга гармоніка 60 Гц.

Як уже згадувалося, в калібрувальному режимі сигнал на виході кожного приладу є сумою двох складових: власне сигналу калібрування, який подається безпосередньо на підсилювач, та фізичного сигналу, який реєструється давачем у навколишньому середовищі. Це дало можливість не втрачати дані вимірювань у режимі калібрування, що можна продемонструвати на прикладі розглянутого каналу $E_{2\sim}$. До даних, показаних на рис. 4, а, була застосована вузькосмугова фільтрація — режекція калібрувального сигналу (гармоніки 1 кГц). Після усунення збоїв був отриманий сигнал, показаний на рис. 4, б. Підтвердженням того, що він дійсно містить дані вимірювання, є наявність в його фур'є-спектрі гармоніки з частотою 30 Гц, якою калібрувався пояс Роговського, розташований на штанзі біля зонда EZ4, котрий формував покази каналу $E_{2\sim}$. Таким чином, електричні зонди сприймали змінне електромагнітне поле, випромінюване котушкою пояса Роговського в режимі калібрування.

ВИСНОВКИ

В результаті роботи КНА «Варіант» на борту супутника «Січ-1М» отримано значний обсяг наукової інформації. Для виправлення збоїв у даних було розроблено програмне забезпечення та створено каталог одержаних експериментальних результатів. Цей каталог міститься в Інституті космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України. Разом з даними вимірювань він містить допоміжну інформацію, необхідну для наукової інтерпретації експериментальних результатів: про моменти вимірювань, частоти опитування давачів, розраховані параметри

орієнтації, місцезнаходження супутника та ін. Програмне забезпечення вдосконалюється й далі; продовжуються роботи над створенням другої версії каталогу, до якої увійдуть додатково відновлені дані експерименту «Варіант».

Попередня інтерпретація отриманих даних виявила правильність роботи КНА «Варіант» у режимі калібрування, а також дозволила зібрати результати вимірювань усіх каналів КНА «Варіант», які відповідають реальним фізичним процесам в іоносфері [2, 3, 5].

1. Корепанов В. Е., Негода А. А., Ивченко В. Н. и др. Космический научный эксперимент «Вариант» на борту ИСЗ «Січ-1М» // Сб. тр. Первой украин. конф. по перспективному космическому исследованию (Киев, 8—10 октября 2001 г.). — Киев, 2001.—С. 51—58.
2. Корепанов В. Е., Ивченко В. М., Лізунов Г. В. та ін. «Варіант» — перший міжнародний науковий експеримент на борту українського супутника // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 4.—С. 3—9.
3. Корепанов В. Е., Крючков Є. І., Лізунов Г. В. та ін. Експеримент «Варіант» на супутнику «Січ-1М» — перші результати // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 4.—С. 10—17.
4. Корепанов В., Негода О., Лізунов Г. та ін. Проект «Варіант»: вимірювання електромагнітних полів та електричних струмів іоносферної плазми на супутнику «Січ-1М» // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 5/6.—С. 3—8.
5. Korepanov V., Krasnoselskikh V., Lizunov G., et al. Experiment Variant onboard Ukrainian satellite Sich-1M — first results // COSPAR 2006: Abstracts of the 36th COSPAR Scientific Assembly (July 16—23, 2006, Beijing, China). — Beijing, 2006.—d3.2-0014-06.

SYSTEMATIZATION AND PRELIMINARY PROCESSING OF DATA FROM THE EXPERIMENT VARIANT ONBOARD THE SICH-1M SATELLITE

Ye. I. Kriuchkov, G. V. Lizunov, P. O. Usenko,
V. Yo. Hlemba

The measurement channels of the VARIANT scientific payload onboard the Sich-1M satellite are described. The channels allow one to detect three components of electric field, three components of dc magnetic field and two components of alternative magnetic field and of spatial current density in the ionosphere. During the flight test phase of the Sich-1M satellite (the first half of 2005), about 230 MB of the VARIANT experiment information was obtained and telemetered to ground-based stations. The paper gives some results of systematization and preliminary processing of these data and of their verification using calibration operation mode.